

贾龙, 张毅, 蒙彦, 等. 跨孔雷达层析成像方法定量评价岩溶发育程度研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 351-358.

DOI: 10.11932/karst20250212

跨孔雷达层析成像方法定量评价岩溶发育程度研究

贾龙^{1,2}, 张毅³, 蒙彦^{1,2}, 李录娟¹, 潘宗源^{1,2}, 吴远斌^{1,2}, 殷仁朝^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心, 广西 桂林 541004; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610036)

摘要: 利用跨孔雷达走时层析成像和衰减层析成像技术实现钻孔之间地层岩溶发育程度的精细化定量评价, 可弥补实际工程中钻探密度的限制。走时层析成像方法可得到岩溶地层中电磁波传输速度分布情况。因雷达波速是地层介电常数的函数, 故可推导出岩溶地层的孔隙比, 进而得到钻孔之间可溶岩的岩溶率的空间变化情况。衰减层析成像方法可得到岩溶地层中电磁波衰减系数分布情况。对于岩土这种低损耗材料, 衰减系数与地层电导率成正比, 与地层相对介电常数的平方根成反比, 而岩溶地层电导率和相对介电常数与地层岩溶率密切相关, 据此可量化钻孔之间岩溶率的空间变化情况。工程实例显示, 两种方法得到的岩溶率空间分布结果一致, 可相互印证精细评价钻孔之间不同埋深地层的岩溶发育程度, 为地质勘察和工程建设提供更详实的数据支撑。

关键词: 岩溶率; 跨孔雷达; 岩溶探测; 岩溶发育评价

创新点: 鉴于实际地质勘察中可溶岩层真实岩溶率较难被获得, 本研究利用跨孔地质雷达走时层析成像和衰减层析成像两种技术方法, 对雷达透射数据进行处理分析, 分别换算得到钻孔间地层岩溶率数值变化情况。经实例验证, 两种技术方法所得的结果相互印证。

中图分类号: P631; P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)02-0351-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

跨孔地质雷达层析成像属于钻孔之间电磁波层析成像方法^[1-2], 是钻孔雷达探测的一种方式。即在一个钻孔(发射孔)发射电磁波, 在另外一个钻孔(接收孔)接收透射信号, 记录信号的运动学(走时、射线路径)和动力学(波形、振幅、相位、频率)特征, 利用层析成像技术分析孔间介质对信号的影响, 获取两个钻孔之间地层的物性分布特征, 达到反演介质内部结构的目的。雷达层析成像方法能识别具有

明显物理性质差异(介电常数、电导率)的地下结构, 如孤石^[3]、裂隙、溶洞^[4]等不良地质现象和埋藏的公共设施^[5]。该技术利用钻孔进入地下深部探测, 可隔离地面以上干扰, 弥补实际工程中钻探密度的限制^[6]。近年来, 钻孔雷达测井技术因其能够精确地、更大范围地提供深部地质信息而越来越多地应用在岩溶地质勘察^[7]。该技术以往多用于探测地下岩溶裂隙和岩溶洞穴等岩溶形态^[8], 而对如何利用跨孔地质雷达进行地层岩溶发育程度的定量分析, 鲜有学者研究。

资助项目: 广西重点研发计划项目《岩溶路基塌陷加筋垫层防控与光纤传感监测体系集成研发与应用示范》; 中国地质调查局中国地质科学院基本科研业务费项目《岩溶塌陷大型物理模拟试验模型装置研发》(2021010); 中国地质调查局项目《岩溶塌陷地质灾害风险评价》

第一作者简介: 贾龙(1985—), 男, 博士, 副研究员, 从事岩溶工程地质安全方面的研究。E-mail: jialong12@foxmail.com。

通信作者: 李录娟(1986—), 女, 副研究员, 从事岩溶水工环方面的研究工作。E-mail: llujuan@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-03-30

岩溶的发育程度可用岩溶率(K)定量表示,即在岩溶作用下产生的各种空隙体积与岩土体体积的比值。但在实际的地质勘察中可溶岩层真实的岩溶率较难被获得,一般采用钻孔线岩溶率来表征^[9],即钻孔线岩溶率=见洞隙的钻孔进尺之和÷钻探总进尺×100%^[10]。故通过跨孔地质雷达层析成像得到孔间“面”岩溶率,可为岩溶地质勘察提供更详实的数据。

本研究拟用跨孔雷达层析成像技术,对雷达透射数据进行处理,换算得到岩溶率数值变化情况,从而对钻孔之间岩溶发育程度进行精细化定量评价。

1 方法原理

1.1 跨孔雷达层析成像方法

跨孔雷达层析成像工作时,先在发射钻孔某一深度固定发射天线(通常为孔底),在接收钻孔升降接收天线,自上而下或自下而上的在不同深度分别接收电磁波信号,得到一组孔间地层的扫描信息。之后,按一定间距改变发射天线深度,再次进行扫描,以此类推,直至扫描射线覆盖两孔间地层剖面,并达到一定的密度(图 1A)。

每条射线都记录了电磁波振幅和走时等有用信息。当两孔间地层剖面内某点附近有条射线通过时,即可采用奥地利科学家 J.Radon 提出的成像计算公式求得该点的物性参数^[11]。根据观测数据及反演目的的不同,层析成像方法可分为走时层析成像和衰减层析成像两种。其中走时层析成像利用直达波的初至时间数据来反演两个钻孔间的电磁波速度分布;而衰减层析成像是利用直达波的振幅来反演两个钻孔间的电磁波衰减场。雷达射线直达波在地下岩石中传播遇到岩溶发育区域时,常被强烈吸收而呈现速度减慢和振幅衰减特性。即通常在雷达层析图像上,充水、充泥的溶洞、裂隙破碎带等相对低电阻率和高介电常数的媒质,表现为电磁波速度分布的低速区或高衰减区,如图 1B 中红色区域;高速区或低衰减区则反映该区域岩层相对完整,有较高的电阻率和较低的介电常数,如图 1B 中蓝色区域。据此,跨孔雷达层析成像可圈定钻孔之间裂隙和洞穴等不良地质形态的分布范围。

1.2 波速层析成像计算岩溶率原理

在岩溶发育区,岩溶裂隙中的填充物(包括空气、水或是松散土)是引起岩体介电常数差异的主要因素。雷达波速是地层介电常数的函数^[12],通过跨孔

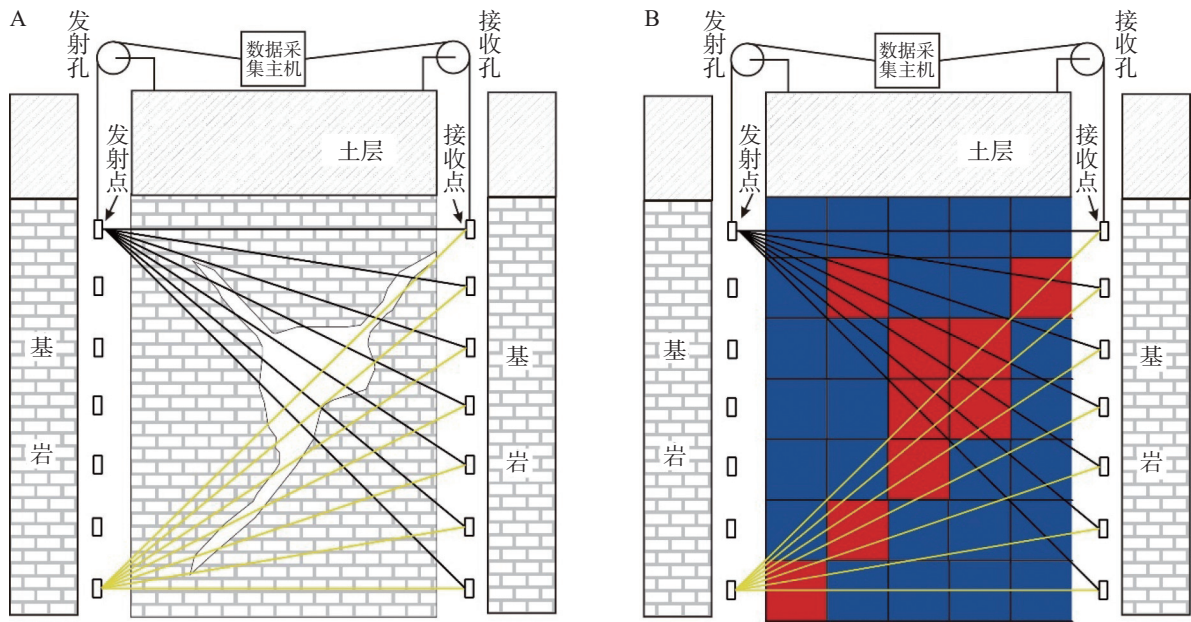


图 1 跨孔地质雷达探测原理示意图

A. 地质模型 B. 层析成像模型,红色的区域为低速区或高衰减区,蓝色区域为高速区或低衰减区

Fig. 1 Schematic diagram of cross-hole geo-radar

A. Geological model B. Tomography model, the red area represents the low-speed or high attenuation zone, and the blue area represents the high-speed or low attenuation zone

雷达测量岩溶地层中电磁波传输速度,可推导出灰岩的孔隙比(n),进而得到钻孔之间灰岩的岩溶发育率变化情况。

1.2.1 波速 (V) 与介电常数 (ε)

对于非磁性低损耗材料,电磁波的传播速度(V)主要取决于传播介质的相对介电常数(ε)^[13],即

$$\varepsilon = \left(\frac{C}{V}\right)^2 \quad (1)$$

$$\sqrt{\varepsilon} = V/C \quad (2)$$

式中: V 是雷达信号的速度,可由跨孔雷达走时层析成像得出; C 为光速,其值为 $2998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 299.8 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, ε 为岩层相对介电常数。

1.2.2 岩溶地层的相对介电常数 (ε_R)

岩溶地层的相对介电常数 ε_R ,可由岩体的介电常数(ε_L)和岩溶裂隙中填充物的介电常数(ε_T)的体积比确定^[13],即:

$$\sqrt{\varepsilon_R} = \frac{n\sqrt{\varepsilon_T} + \sqrt{\varepsilon_L}}{n+1} \quad (3)$$

式中: n 为岩溶裂隙体积与岩石固体体积的比值,数值上可认为与岩石的孔隙比相等; ε_R 为岩溶地层的介电常数, ε_T 为岩溶裂隙中填充物的介电常数。

1.2.3 岩溶率 (K) 与波速关系 (V)

对于岩溶地层,岩溶率(K)为岩溶裂隙体积与岩石体积的比值,即

$$K = n/(1+n) \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得岩溶率与介电常数的关系,即:

$$K = \frac{\sqrt{\varepsilon_R} - \sqrt{\varepsilon_L}}{\sqrt{\varepsilon_T} - \sqrt{\varepsilon_L}} \quad (5)$$

将式(1)代入式(5),可得到岩溶率与岩溶地层中电磁波传输速度的关系,即

$$K = \frac{V/C - \sqrt{\varepsilon_L}}{\sqrt{\varepsilon_T} - \sqrt{\varepsilon_L}} \quad (6)$$

1.3 衰减层析成像计算岩溶率原理

1.3.1 衰减系数 (α)

当电磁波在介质中传播时,其振幅(A)随着传播距离的增大,从初始值(A_0)呈指数衰减^[14-15],如下式:

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_R}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\sigma_R}{2\sqrt{\varepsilon_R}} = Z_0 \frac{\sigma_R}{2\sqrt{\varepsilon_R}} \quad (8)$$

式中: α 是衰减系数,单位为 $\text{np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。 $Z_0 = 377 \Omega$,为自由空间波阻抗常数。对于低损耗材料,衰减系数与雷达频率无关,与岩石电导率(σ_R)成正比,与相对介电常数的平方根 $\sqrt{\varepsilon_R}$ 成反比。

1.3.2 岩溶地层电导率 (σ_R)

根据麦克斯韦所给出的由两种材料组成的介质的电导率理论公式^[16-17]:

$$\sigma_s = \sigma_1 \frac{3\sigma_2 - 2\phi(\sigma_2 - \sigma_1)}{3\sigma_1 + \phi(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (9)$$

式中: σ_1 和 σ_2 分别代表材料1和材料2的电导率; σ_s 表示介质的电导率; ϕ 是材料1对整个介质的体积比。

因此岩溶地层的电导率,可表示为

$$\sigma_R = \sigma_T \frac{3\sigma_L - 2K(\sigma_L - \sigma_T)}{3\sigma_T + K(\sigma_L - \sigma_T)} \quad (10)$$

式中: σ_R 、 σ_L 、 σ_T 分别为岩溶地层电导率、灰岩岩体电阻率、岩溶填充物电阻率; K 为岩溶率。

1.3.3 岩溶率 (K) 与衰减系数 (α)

将式(3)、(4)和(9)带入式(8)中可得:

$$\alpha = \frac{Z_0}{2} \frac{\sigma_T \frac{3\sigma_L - 2K(\sigma_L - \sigma_T)}{3\sigma_T + K(\sigma_L - \sigma_T)}}{K\sqrt{\varepsilon_w} + (1-K)\sqrt{\varepsilon_L}} \quad (11)$$

式中: σ_R 为岩溶地层电导率; σ_L 为灰岩岩体电阻率; σ_T 为岩溶填充物电阻率,可由测量和经验统计得出; Z_0 为自由空间波阻抗常数,为 377Ω ; α 是雷达电磁波衰减系数,单位为 $\text{np} \cdot \text{m}^{-1}$,可由跨孔雷达探测后计算得出; K 为岩溶率。

2 计算实例过程及结果分析

2.1 地质条件和钻孔情况

计算实例的测区为覆盖型岩溶区。覆盖层为第四系全新统(Q_4),土层结构主要为一元结构,粉质黏土,一般 $24.0 \sim 29.5 \text{ m}$ 厚;下伏基岩为三叠系中统石灰岩,岩溶较为发育。测区地层的物性参数见表1。

本文选取其中两个孔(ZK1, ZK3)进行了跨孔雷达层析成像的岩溶发育评价过程展示。发射孔 ZK1,接收孔 ZK3 相距 6 m 。钻孔 ZK1 孔深 45.5 m ,揭露

表 1 研究区地层的电性参数
Table 1 Electrical parameters of the strata in the study area

介质	相对介电常数	电导率/ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	传播速度/ $\text{m}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	衰减系数/ $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	衰减系数/ $\text{np}\cdot\text{m}^{-1}$
空气	1	0	300	0	0
岩溶水	81	0.05	33	0.1	0.011 5
干石灰岩	7	$10^{-8}\sim 10^{-6}$	113	0.4	0.046 0
湿石灰岩	8	0.018	106	0.4~1	0.046~0.115 1
饱和黏土	15	0.08	60~90	1~300	0.115 1~34.538 3

0~26.3 m 为第四系覆盖层, 26.3~40.5 m 碳酸盐岩。其中埋深 25.5~37.5 m 处发育溶洞。钻孔 ZK3 孔深 45.5 m, 揭露 0~28.7 m 为第四系覆盖层, 28.7~45.5 m 为碳酸盐岩。其中埋深 28.8~30.1 m 和 31.3~31.9 m 处发育溶洞。钻孔揭露地层信息见表 2。钻孔 ZK1 和 ZK3, 均揭露了溶洞, 而钻孔之间岩溶发育情况不明。该区域拟进行桥梁工程建设, 采用桩基础, 必须穿过溶洞达到稳定基岩持力层。因此拟利用钻孔雷达探测地层岩溶发育情况, 为岩溶整治设计提供基础资料。

表 2 测孔信息表
Table 2 Table of borehole information

	深度/m	岩土特征
发射孔 ZK1	26.3	覆盖土层: 填筑土(0~1.5 m), 粉质黏土
	27.5	中风化石灰岩: 青灰色, 隐晶质结构, 中厚层构造, 节理裂隙发育
	30.5	溶洞: 全充填, 黄褐色, 充填物为粉质黏土及碎石, 粉质黏土呈可塑状
	40.5	中风化石灰岩: 青灰色, 隐晶质结构, 中厚层构造, 节理裂隙发育
接收孔 ZK3	28.7	覆盖土层: 填筑土(0~1.7 m), 粉质黏土
	28.8	中风化石灰岩: 青灰色; 隐晶质结构, 中厚层构造, 节理裂隙发育, 岩芯呈柱状
	30.1	溶洞: 全充填, 棕红色, 充填为粉质黏土, 可塑
	31.3	中风化石灰岩: 青灰色, 隐晶质结构, 中厚层构造, 节理裂隙发育
	31.9	溶洞: 半充填, 黄褐色, 充填物为粉质黏土, 流—软塑状
	45.5	中风化石灰岩: 青灰色, 隐晶质结构, 中厚层构造, 节理裂隙发育

2.2 仪器设备和采集参数

本次探测设备为瑞典 MALA 公司 (MALA GEOSCIENCE AB) 生产的 100 Mhz 孔中雷达天线、ProEx 雷达主机、专用光缆和测距轮等, 以及采集软件 GroundVision 和数据处理软件 WinTomo(图 2)。孔中雷达天线为细圆柱状, 发射天线长 1.8 m, 接收天线长 1.7 m, 直径均为 50 mm, 在干孔和充水钻孔中均可应用。

探测过程中, 发射孔发射点移动间距为 1 m, 移动范围为 25~42 m。接收孔采样点间距为 10 cm, 即自上而下或自下而上移动雷达接收天线的采样点间距为 10 cm, 移动范围以接收的直达波信号消失为止。采集过程采用 GroundVision 软件记录探测数据。

2.3 数据处理

利用跨孔雷达层析成像技术进行岩溶发育程度量化评估的流程如下:

(1) 数据处理软件 WinTomo 读入由 GroundVision 采集的数据, 剔除坏道后, 拾取直达波位置。并导入钻孔位置数据和雷达扫描列表数据, 设置带通滤波频率(高切频率为 120 MHz, 低切频率为 38 MHz)和反演网格尺寸(2 m×2 m)。数据反演采用修饰共轭梯度法, 进行雷达波速度和振幅衰减系数反演, 其单位分别为 $\text{m}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 和 $\text{np}\cdot\text{m}^{-1}$ 。得到钻孔之间地层二维剖面的雷达波速度和衰减分布图(图 3A, 图 3B)。

(2) 根据孔间地层雷达波的速度数据, 采用公式(6)计算得出钻孔之间灰岩的岩溶率空间变化情况,

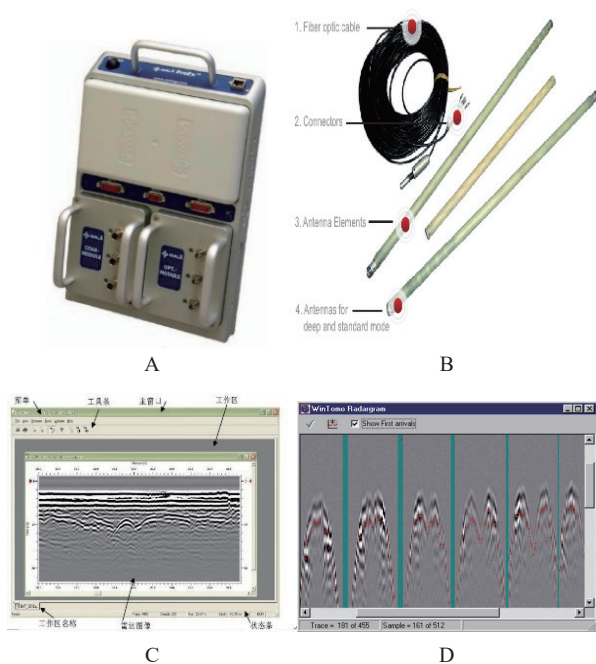


图2 探测所用仪器设备和软件

A. ProEx 雷达主机 B. 100 MHz 孔中雷达天线 C. 采集软件 GroundVision
D. 数据处理软件 WinTomo

Fig. 2 Instruments and software of cross-hole geo-radar

A. ProEx radar host B. 100 MHz hole radar antenna C. Acquisition software GroundVision
D. Data processing software WinTomo

结果见图3C。

(3)根据孔间地层雷达波的衰减系数的空间数据,采用式(11)解方程可得岩溶率空间分布图,结果见图3D。

2.4 结果分析

波速分布图和衰减分布图(图3A,图3B),均显示ZK1和ZK3之间地层有两处异常。①位于埋深在28~32 m处,基本贯通两孔之间地层。异常中心波速为 $55\sim 65\text{ m}\cdot\mu\text{s}^{-1}$,衰减系数为 $0.9\sim 1.0\text{ np}\cdot\text{m}^{-1}$,根据测区地层的物性参数(表1),推测为流-软塑状饱和黏土填充的溶洞;②为37~41 m处,距离ZK3约1.5 m处。异常中心波速为 $70\sim 75\text{ m}\cdot\mu\text{s}^{-1}$,衰减系数为 $0.2\sim 0.4\text{ np}\cdot\text{m}^{-1}$,根据测区地层的物性参数(表1),推测为由可塑状饱和黏土填充的溶洞。

走时层析成像和衰减层析成像计算出的岩溶率(图3C,图3D)显示,埋深在28~32 m处,异常区岩溶率大于40%;37~41 m处,距离ZK3约1.5 m,异常区岩溶率在15%~20%。两种计算方法计算出的岩溶率数值相近,但由于方法原理不同,数值上略有差别。

结合钻探成果,根据跨孔雷达走时层析成像和

衰减层析成像得出的波速(图3A)和衰减系数(图3B)物性参数以及岩溶率(图3C,图3D)分布情况,可绘制钻孔之间岩溶发育分布图(图4)。埋深在28~32 m处,推测为流-软塑状饱和黏土填充的溶洞基本贯通两孔之间地层。埋深37~41 m处,推断为由可塑状饱和黏土填充的溶洞。

2.5 验证分析

覆盖岩溶区桩基勘察实例显示,经跨孔地质雷达探测,钻孔ZK1与钻孔ZK3之间,深度27.5~32 m和34~40 m为低波速区和高衰减区。波速分布图显示的低速区和振幅衰减分布图显示的高衰减区范围基本相同,且与ZK1和ZK3钻探结果具有一致性,证明其数据准确性。根据走时层析成像和衰减层析成像分别计算出的两孔之间地层岩溶率数值空间分布图,埋深在28~32 m处,异常区岩溶率大于40%;37~41 m处,异常区岩溶率为15%~20%。两种方法得出的岩溶率数值空间分布图对比分析,结果一致,相互印证,可为测区桥梁工程桩基础的设计避开岩溶发育区提供重要且准确的依据。

3 结论及建议

(1)利用跨孔地质雷达走时层析成像技术可得到岩溶地层中电磁波传输速度分布情况。在岩溶发育区,岩溶裂隙和孔洞中的填充物(包括空气、水或松散土)是引起测量剖面中岩体介电常数差异的主要因素,而雷达波速是地层介电常数的函数,故可推导出钻孔之间可溶岩的岩溶发育率空间变化情况。

(2)利用跨地质孔雷达衰减层析成像的方法可得到岩溶地层中电磁波衰减系数分布情况。对于岩土这种低损耗材料,衰减系数与地层电导率成正比,与地层相对介电常数的平方根成反比,而岩溶地层电导率和相对介电常数与地层岩溶率密切相关,就此可量化钻孔之间岩溶发育率空间变化情况。

(3)工程实例显示,根据跨孔雷达走时层析成像和衰减层析成像技术,绘制得出的测试钻孔之间岩溶分布图显示,埋深在28~32 m处,为流-软塑状饱和黏土填充的溶洞基本贯通两孔之间地层。埋深37~41 m处,为由可塑状饱和黏土填充的溶洞。两种方法得到的岩溶率空间分布结果一致,可相互印证精细评价钻孔之间不同埋深地层的岩溶发育程度,

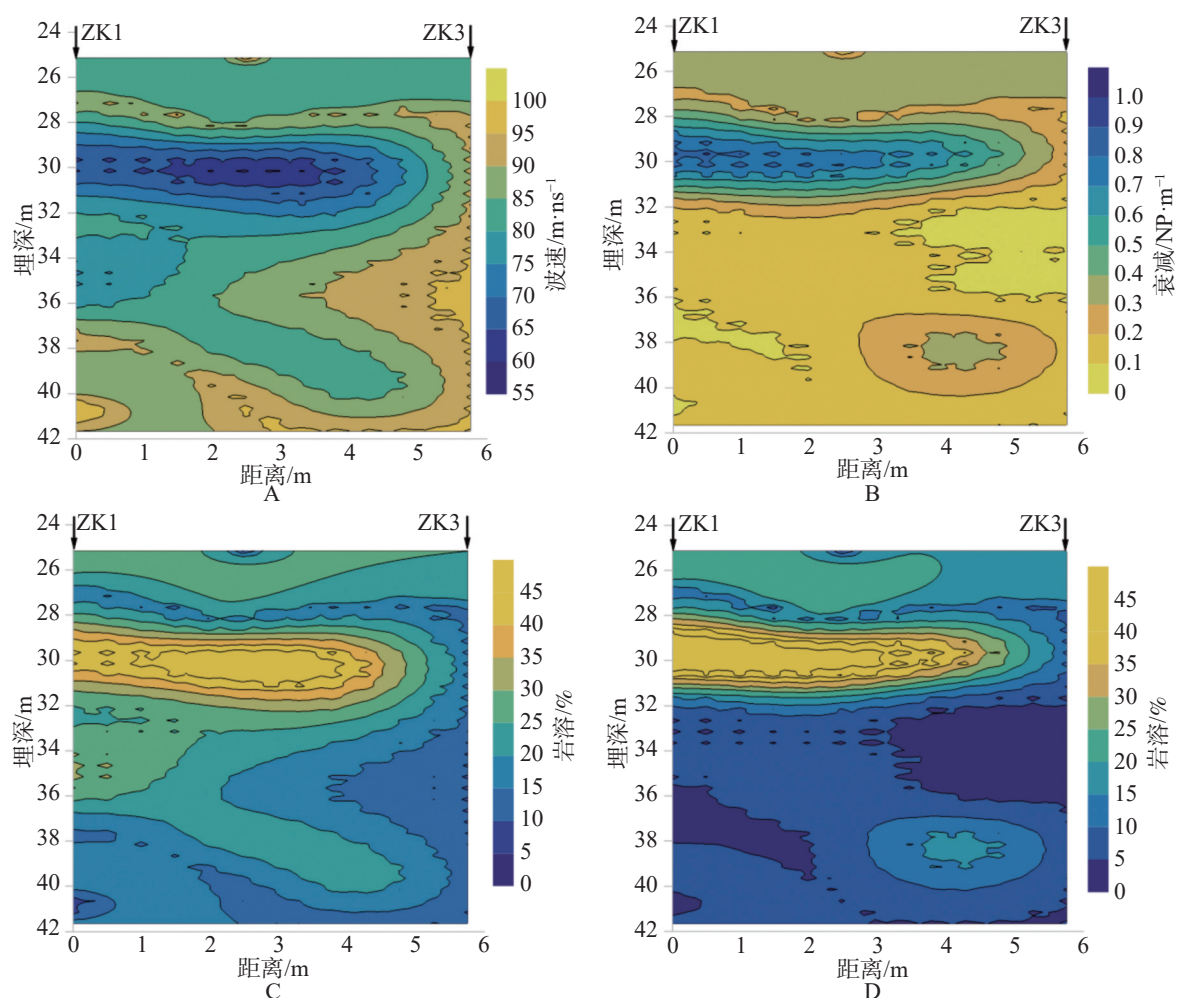


图3 基于跨孔雷达层析成像的钻孔剖面岩溶发育评价图(ZK1-ZK3)

A.波速分布图 B.衰减分布图 C.波速计算岩溶率图 D.衰减计算岩溶率图

Fig. 3 Karst development evaluation of borehole profile based on cross-hole geo-radar tomography (ZK1-ZK3)

A. Wave velocity distribution diagram B. Attenuation distribution diagram C. Wave velocity calculation karst rate diagram D. Attenuation calculation karst rate diagram

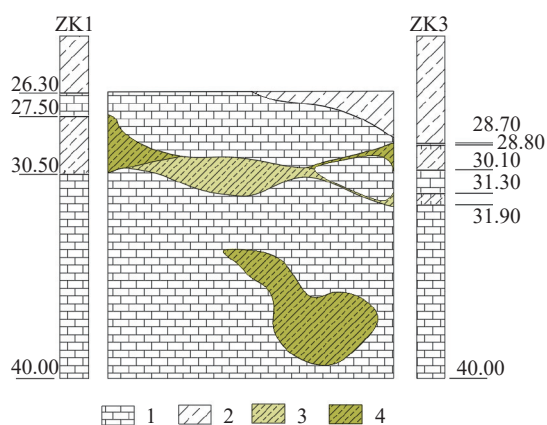


图4 发射孔 ZK1 和接收孔 ZK3 之间地层解译图

1.灰岩 2.粉质黏土 3.流-软塑状粉质黏土 4.可塑状粉质黏土

Fig. 4 Interpretation diagram of the strata between transmitting hole ZK1 and receiving hole ZK3

1. Limestone 2. Silty clay 3. Flow soft plastic silty clay 4. Plastic silty clay

为地质勘察和工程建设提供更详实的数据支撑。

(4)根据跨孔雷达的波速和衰减确定地层岩溶率准确数值需要建立在对地层各项物性参数准确值掌握的基础上。所需地层各项物性参数可根据岩心的室内测试取得。

(5)鉴于物探成果的多解性和岩溶地质的复杂性,实际探测过程中应与钻孔雷达反射成像探测以及其他物探手段配合使用。

参考文献

- [1] 刘四新,倪建福. 井间电磁法综述[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 153-165.
LIU Sixin, NI Jianfu. Review for cross-hole electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 153-165.
- [2] Holliger K, Musil M, Maurer H R. Ray-based Amplitude

- Tomography for Crosshole Georadar Data: a Numerical Assessment[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, 47(3-4): 285-298.
- [3] 张业, 谢昭晖, 师学明. 跨孔雷达层析成像法在孤石探测中的数值模拟研究[J]. *铁道建筑技术*, 2015(10): 55-58, 73.
ZHANG Ye, XIE Zhaohui, SHI Xueming. Numerical Simulation of Cross-hole Radar Tomography in Boulder Detection[J]. *Railway Construction Technology*, 2015(10): 55-58, 73.
- [4] 李尧. 隧道施工不良地质跨孔雷达超前探测方法与工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
LI Yao. the Crosshole GPR Ahead Prospecting Method and its Application for Adverse Geology in Tunnel Construction [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [5] 张东昊. 基于深度学习和跨孔雷达的地下连续墙缺陷识别方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
ZHANG Donghao. Diaphragm Wall Defect Recognition Based on Deep Learning and Crosshole Ground Penetrating [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [6] 王飞. 跨孔雷达走时层析成像反演方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
WANG Fei. Research on Crosshole Radar Traveltime Tomography [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [7] 贾龙, 蒙彦, 潘宗源, 殷仁朝. 钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 124-129.
JIA Long, MENG Yan, PAN Zongyuan, YIN Renchao. Study on application of borehole radar reflection imaging in the detection of karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 124-129. (in Chinese)
- [8] 贾龙, 蒙彦, 吴远斌, 潘宗源. 地面与孔中地质雷达方法联作在覆盖型岩溶塌陷隐患识别中的应用[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(3): 437-443.
JIA Long, MENG Yan, WU Yuanbin, PAN Zongyuan. Application of ground and hole geological radar system in the identification of karst collapse hidden danger[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(3): 437-443.
- [9] 张凯, 霍晓龙, 陈寿根, 涂鹏, 谭信荣. 地下岩溶发育程度评价体系的初步探讨[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(3): 565-573.
ZHANG Kai, HUO Xiaolong, CHEN Shougen, TU Peng, TAN Xinrong. Preliminary Study of Assessment System for Subsurface Karst Development Degree[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(3): 565-573.
- [10] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
Former Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental Protection of the People's Republic of China. Code for Design of building foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1991.
- [11] 张昊. Radon 变换在 GPR 数据处理中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2005.
ZHANG Hao. Application of Radon Transform in GPR data Processing [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [12] 黄家会, 宋雷, 崔广心, 杨维好. 应用跨孔雷达层析成像技术研究深部岩层特性[J]. *中国矿业大学学报*, 1999(6): 61-64.
HUANG Jiahui, SONG Lei, CUI Guangxin, YANG Weihao. Application of Crosshole Radar Tomography in Studying Characteristics of Strata in Depths[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999(6): 61-64.
- [13] Steelman C M, Kennedy C S, Parker B L. Geophysical conceptualization of a fractured sedimentary bedrock riverbed using ground-penetrating radar and induced electrical conductivity[Z]. *Journal of Hydrology*, 2015: 433-446.
- [14] Annan A P. Near-surface Geophysics[M]. 2005: 357-438.
- [15] 曾昭发, 刘四新, 冯炬. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 102-103.
ZENG Zhaofa, LIU Sixin, FENG Xuan. Principles and Applications of ground penetrating radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 102-103.
- [16] 姜文龙, 刘英. 岩石在单轴压力环境下电阻率变化的研究[J]. *地质学刊*, 2009, 33(3): 299-302.
JIANG Wenlong, LIU Ying. Study on variation of electrical resistivity under uniaxial pressure environment for rocks[J]. *Journal of Geology*, 2009, 33(3): 299-302.
- [17] 王超, 徐杨青, 高晓耕. 岩石电阻率特性及在煤矿采空区探查中的应用[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(11): 64-69.
WANG Chao, XU Yangqing, GAO Xiaogeng. Rock resistivity characteristics and its application in coal mine goaf exploration[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(11): 64-69.

Karst development evaluation based on cross-hole radar tomography

JIA Long^{1,2}, ZHANG Yi³, MENG Yan^{1,2}, LI Lujuan¹, PAN Zongyuan^{1,2}, WU Yuanbin^{1,2}, YIN Renchao^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Innovation Center of Karst Collapse Prevention Technology, China Geological Survey, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. China Railway Second Institute Engineering Group Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract Cross-hole geo-radar tomography, which belongs to the method of electromagnetic wave tomography between boreholes, is a way of borehole radar detection. Specifically, electromagnetic waves are transmitted from one borehole (transmitting borehole) and the transmitted signals are received by another borehole (receiving borehole). The kinematic (travel time and ray path) and dynamical (waveform, amplitude, phase, and frequency) characteristics of these signals are recorded. By tomography technology, the influence of the medium between the boreholes on the

signals is analyzed to obtain the distribution of physical properties within the strata between the two boreholes, with the goal of inverting the internal structure of the medium. As a result, the geo-radar tomography method can identify underground structures that exhibit significant differences in physical properties, such as dielectric constant and conductivity. These underground structures include solitary rocks, fissures, caves, and other adverse geological phenomena, as well as buried public facilities. This technology can penetrate deep into subsurface for detection through drilling boreholes, effectively isolating the interference from above ground and compensating for the limitations of drilling density in practical engineering.

In geological field surveys, accurately determining true karstification rate of the soluble rock layers poses significant challenges. Consequently, the karstification rate along the drilling line is typically employed as a representation measure, which has inherent limitations. To enhance the quantitative analysis of karst development within strata, this study employs cross-hole geo-radar tomography technology to process radar transmission data. This approach allows for the calculation of numerical changes in karstification rates, facilitating a more precise quantitative evaluation of the degree of karst development between boreholes.

In karst areas, the materials filling karst fissures—such as including air, water, and loose soil—are the primary factors contributing to variations in the dielectric constant of rock masses. The velocities of radar waves are a function of the dielectric constant of the geological strata. By measuring the transmission velocities of electromagnetic waves in karst strata through cross-hole geo-radar, the porosity of limestone can be determined, allowing for the assessment of variations in the karstification rate between boreholes. The cross-hole geo-radar tomography method can provide insights into the distribution of transmission velocities of electromagnetic waves in karst strata, and thereby revealing the spatial variations in the karstification rates of soluble rocks between boreholes.

When electromagnetic waves propagate in karst strata, their amplitudes exhibit exponential attenuation. In karst areas, the materials filling in karst fissures are also the main factors contributing to variations in electromagnetic wave attenuation. The cross-hole geo-radar tomography method can obtain the distribution of attenuation coefficients of electromagnetic waves in karst strata. For low-loss materials such as rock and soil, the attenuation coefficient is directly proportional to the conductivity of strata and inversely proportional to the square root of the relative dielectric constant of strata. Moreover, the conductivity and the relative dielectric constant of karst strata are closely related to the karstification rates of strata. Based on this, the spatial variations of karstification rates between boreholes can be quantified.

Engineering examples demonstrate that, based on the physical parameters—wave velocity and attenuation coefficient—derived from the cross-hole geo-radar travel time tomography and attenuation tomography, as well as the distribution of karstification rates, it is feasible to map the distribution of karst development between boreholes. At a burial depth of 28 m to 32 m, it is inferred that karst caves are filled with flowing-soft plastic saturated clay and are likely to span the strata between the two boreholes. At a burial depth of 37 m to 41 m, it is presumed that karst caves are filled with plastic saturated clay. The spatial results of karstification rates obtained from both methods are consistent and mutually corroborative, providing a refined quantitative evaluation of the degree of karst development in strata at varying burial depths between boreholes. This provides more detailed data support for geological surveys and engineering construction. In addition, the accurately determining the karstification rates of strata based on wave velocity and attenuation of the cross-hole geo-radar requires precise values of all physical parameters of strata. These parameters can be obtained through laboratory tests on rock cores.

Theoretical analysis and on-site testing demonstrate that the application of cross-hole geo-radar travel time tomography and attenuation tomography techniques can achieve a precise quantitative evaluation of the karst development degree in the strata between boreholes, thereby obtaining the inter-borehole "surface" karstification rates. This will provide more detailed data for karst geological surveys. In addition, considering the multisolution nature of geophysical survey results and the complexity of karst geology, it is recommended to combine these techniques with imaging detection of borehole radar reflection and other geophysical methods during actual detection.

Key words karstification rate, cross-hole geo-radar, karst detection, evaluation of karst development

(编辑 张玲)